

基于 1150 nm 光纤激光抽运的中红外掺铽光纤激光器

湛鸿伟, 沈炎龙, 陶蒙蒙, 栾昆鹏, 黄珂, 冯国斌

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 采用 1150 nm 光纤激光振荡器作为抽运源, 实现了 3 μm 波段中红外掺铽光纤激光器出光。该激光器采用线性谐振腔结构, 其由镀金全反射镜与切割角度为 0° 的光纤端面构成。增益介质为一段长为 4.5 m 的双包层铽共掺氟化物光纤, 纤芯直径为 10 μm , 纤芯数值孔径为 0.2。当 1150 nm 抽运激光器功率为 1.43 W 时, 中红外掺铽光纤激光器输出功率为 115 mW, 激光器系统的光-光转换效率为 8.0%。在输出最大功率时, 输出激光中心波长为 2868.4 nm, 输出光谱的半峰全宽为 1.3 nm。相关研究成果对研制高功率紧凑型中红外掺铽光纤激光器具有一定的参考价值。

关键词 激光器; 掺铽光纤; 中红外波段; 氟化物光纤

中图分类号 TN212; TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0801009

Mid-Infrared Ho-Doped Fiber Laser Pumped by 1150 nm Fiber Laser

Chen Hongwei, Shen Yanlong, Tao Mengmeng, Luan Kunpeng, Huang Ke, Feng Guobin

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of

Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract A mid-infrared Ho-doped fiber laser localized at 3 μm band is achieved using the all-fiber 1150 nm fiber laser oscillator as the pump source. The Ho-doped fiber adopts a linear cavity structure which consists of a high-reflectivity golden mirror and a vertical-cut fiber tip. A 4.5 m Ho:Pr co-doped dual cladding fiber is used as the gain media. The core diameter is 10 μm and the numerical aperture of the fiber core is 0.2. When the 1150 nm pump power is 1.43 W, the mid-infrared fiber laser output is 115 mW. The optical-to-optical conversion efficiency of the Ho-doped fiber laser is 8.0%. The central wavelength is 2868.4 nm under the maximum output power and the full width at half maximum is 1.3 nm. The research results can make a contribution to the further development of mid-infrared Ho-doped fiber laser.

Key words lasers; Ho-doped fiber; mid-infrared band; fluoride fibers

OCIS codes 140.3510; 140.3580; 140.5560; 140.5680

1 引言

目前, 中红外波段光纤激光器是激光技术领域的研究热点。采用掺铟离子和掺铽离子的氟化物光纤(ZBLAN), 可以实现 3 μm 波段光纤激光输出^[1]。由于稀土离子能级结构存在差异, 掺铟氟化物光纤的中红外荧光谱主要覆盖 2.70~2.83 μm 波段, 而掺铽氟化物光纤的中红外荧光谱主要覆盖 2.83~2.95 μm 波段, 所以掺铽氟化物光纤激光器更适用于实现长波中红外激光输出^[2-7]。目前, 中红外掺铽光纤激光器已经实现了光谱调谐, 主、被动调 Q 以及锁模脉冲输出^[8-14]。公开报道的红外掺铽光纤激光器, 最高平均输出功率为 7.2 W^[14]。

较早的 3 μm 波段掺铽光纤激光器采用 1100 nm 波段掺镱光纤激光作为抽运源。但由于该抽运光波长偏离铽离子的吸收谱峰(1150 nm 附近), 抽运光的利用率较低。近年来报道的中红外掺铽光纤激光器主要

收稿日期: 2017-02-08; **收到修改稿日期:** 2017-03-20

基金项目: 中国博士后科学基金(2015M582860)

作者简介: 湛鸿伟(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事激光技术及应用方面的研究。

E-mail: chen hongwei@nint.ac.cn

采用 1150 nm 半导体激光器(LD)作为抽运源^[8-13]。然而,1150 nm LD 性能并未像 976 nm LD 那样成熟,其最大输出功率仅为 3 W,从而在一定程度上制约了中红外掺铽光纤激光器的功率提升。

随着光纤激光技术的发展,利用级联拉曼效应已经实现 1150 nm 波段的高功率光纤激光输出。文献[14]采用 1150 nm 级联拉曼光纤激光器作为抽运源。但级联拉曼光纤激光器结构相对复杂,光学转换效率也相对较低。另外,也通过直接激光振荡的方式来实现 1150 nm 波段光纤激光输出。采用该方式的 1150 nm 光纤激光器系统结构简单,光学效率也较高^[15]。在前期工作中研究了基于掺铽光纤直接振荡的 1150 nm 光纤激光输出,在室温下实现了高功率全光纤化 1150 nm 单模光纤激光输出^[16-17]。相关成果为开展 3 μm 波段中红外掺铽光纤激光技术研究奠定了较好的基础。

本文报道了一台线型腔中红外掺铽氟化物光纤激光器。该激光器采用自行搭建的全光纤化 1150 nm 光纤激光器作为抽运源,双包层铽镨共掺氟化物光纤作为增益介质,实现了室温下百毫瓦级的 3 μm 波段中红外光纤激光输出。并对激光器的输出特性进行了详细研究。相关成果对后续研制高功率中红外掺铽光纤激光器具有一定的参考价值。

2 实验原理

以 1150 nm 波段激光器作为抽运源,利用铽离子的⁵I₆ 能级到⁵I₇ 能级的受激辐射跃迁,可以产生 3 μm 波段的激光输出。但是,铽离子激光低能级⁵I₇ 的寿命($\tau_1 = 12$ ms)高于激光高能级⁵I₆ 的寿命($\tau_2 = 3.5$ ms),因此会导致⁵I₆ \rightarrow ⁵I₇ 的激光能级跃迁自终止^[1]。也就是说,从上能级⁵I₆ 向下跃迁到⁵I₇ 能级后,粒子将较长时间处在下能级⁵I₇,不利于形成粒子数反转。为克服⁵I₆ \rightarrow ⁵I₇ 激光能级跃迁自终止,实现粒子数反转,通常有 3 种方法:1)利用高掺杂浓度光纤中相邻铽离子间⁵I₇ 能级的能量上转换过程消耗该能级粒子数;2)使铽离子实现从⁵I₆ 能级到⁵I₇ 能级再到⁵I₈ 能级的级联受激辐射跃迁,同时实现 3 μm 和 2 μm 波段双波长激光。2 μm 波段激光振荡消耗了⁵I₇ 能级的粒子,使 3 μm 波段激光高效振荡;3)与镨离子等敏化离子共掺,利用稀土离子间的能量转移过程(ET)降低⁵I₇ 能级粒子数。然而,高浓度掺杂法需要使用高掺杂浓度的单掺铽光纤,目前商品化的单掺铽光纤的铽离子掺杂浓度相对较低,不利于形成能量上转换过程。级联激光法需要实现双波长的激光振荡,系统结构复杂。基于目前市场上的铽镨共掺光纤产品,因此敏化离子共掺法比较简单可行。本文研究即采用铽镨共掺双包层光纤作为激光增益介质。

3 实验装置

图 1 为所搭建的中红外掺铽氟化物光纤激光器的实验装置结构示意图。该激光器采用空间耦合结构;抽运源为自行搭建的全光纤化 1150 nm 光纤激光器;增益介质是一段长 4.5 m 公司生产的双包层铽镨共掺氟化物光纤(ZDF-10/125,Fiberlab 公司,日本),其内包层为八边形,内径为 125 μm ,纤芯直径为 10 μm ,纤芯数值孔径为 0.2。铽离子和镨离子的掺杂原子数分数分别为 3% 和 0.25%。增益光纤在 1150 nm 波长处的包层吸收系数为 2 dB/m。对增益光纤的一端进行零度角切割,另一端进行 8°角切割。抽运光经非球面透镜 L1 ($f = 15.29$ mm) 准直和 L2 ($f = 18.4$ mm) 会聚后,再经 45°角放置的双色镜 DM (1150 nm 高透,透过率 $T > 93\%$; 2.8 μm 高反,反射率 $R > 95\%$),然后经过切割角度为 0°的光纤端面耦合进入到增益光纤中。

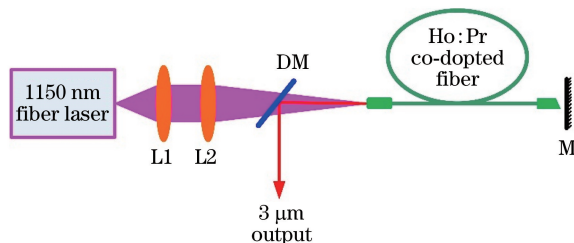


图 1 中红外掺铽光纤激光器装置结构图

Fig. 1 Experimental setup of the mid-infrared Ho-doped fiber laser

镀金全反镜 M 与切割角度为零度的光纤端面构成线型谐振腔。8°角切割的光纤端面可有效消除光纤端面回光,抑制激光寄生振荡。DM 则将从光纤端面出射的中红外波段激光与抽运光进行分离输出。

实验中采用功率计(UP19K-50L-H5, Gentec 公司, 美国)和光谱仪(Shamrock 750, Andor 公司, 英国)对所搭建的中红外光纤激光器的输出功率和输出光谱进行了测量。

4 实验结果与讨论

实验中全光纤化 1150 nm 抽运光纤激光器的最大输出功率为 12.7 W。在最大功率时的输出光谱特性如图 2 所示,中心波长为 1150.48 nm,光谱的半峰全宽(FWHM)为 0.45 nm^[17]。

首先研究中红外掺铥光纤激光器的功率输出特性曲线,如图 3 所示。当抽运激光器的输出功率为 80 mW 时,中红外掺铥光纤激光器开始出光。随着抽运功率的增加,中红外掺铥光纤激光器的输出功率也呈线性增加。在抽运功率为 1.43 W 时,其输出功率达到 115 mW。此时,激光器系统的光-光转换效率为 8.0%,该指标与现有文献报道的结果尚有差距。这主要是由于此激光器的抽运光耦合系统以及增益光纤长度未进行过优化导致的。图 3 所示激光器的功率输出曲线并未显示出功率饱和趋势,说明如果继续增加抽运功率,该激光器还能够实现更高功率输出。但是,氟化物光纤端面极易受到热损伤^[18],如果抽运光耦合效率较低,未耦合进增益光纤的抽运光就会在光纤端面累积生热。出于激光器系统的安全考虑,实验尚未进一步增加抽运功率。

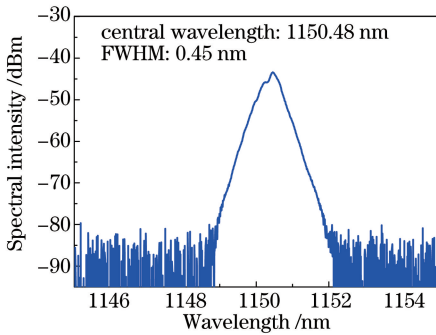


图 2 最大功率时 1150 nm 光纤激光器的输出光谱
Fig. 2 Spectrum of the 1150 nm fiber laser under the maximum output power

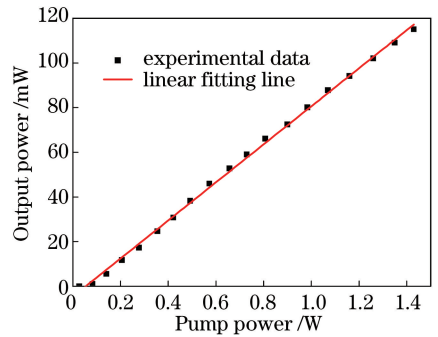


图 3 中红外掺铥光纤激光器功率输出曲线
Fig. 3 Output power curve of the mid-infrared Ho-doped fiber laser

然后,对中红外掺铥光纤激光器的光谱输出特性进行了研究。不同功率水平下的中红外掺铥光纤激光器的输出光谱如图 4 所示。当抽运功率为 1.07 W 时,激光器输出光谱的中心波长为 2866.5 nm,处于掺铥氟化物光纤自发辐射谱的峰值附近。其主要原因是构成谐振腔的镀金全反镜与切割角度为 0°的光纤端面均不具有波长选择性,所以中红外掺铥光纤激光器工作在自由运转状态。随着功率水平的增加,由于增益光纤的重吸收效应,激光器输出光谱的中心波长逐渐红移。并且,随着功率水平的增加,激光器的输出光谱也逐渐加宽,如图 4(a)~(c)所示。在最大功率水平下,激光器输出光谱的 FWHM 为 1.3 nm。本实验采用的双

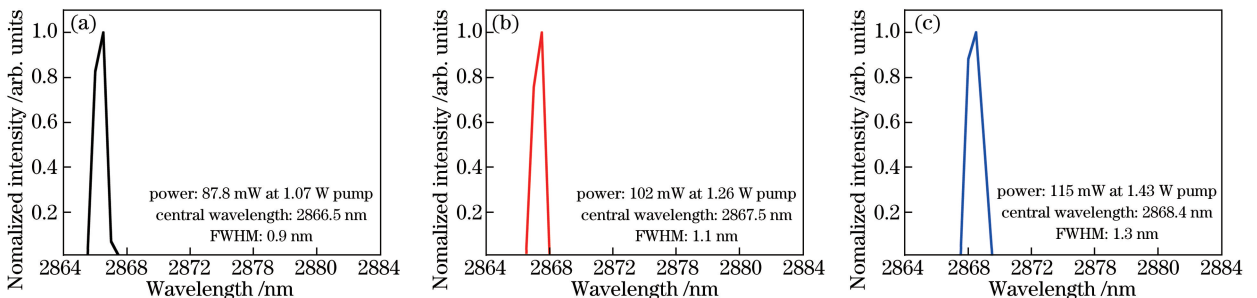


图 4 中红外掺铥光纤激光器在不同功率水平下的光谱特性
Fig. 4 Output spectrum of the mid-infrared Ho-doped fiber laser under different powers

包层光纤的纤芯直径为 $10\ \mu\text{m}$, 纤芯数值孔径为 0.2, 其单模截止波长为 $2610\ \text{nm}$ 。所以该中红外光纤激光器的输出应为基模激光, 这有利于后续应用。

实验搭建的光纤激光器的输出光谱特性较好, 但是其光-光转换效率为 8.0% , 与公开报道的结果还有一定的差距。后续可通过合理选择实验装置中 L1 和 L2 的类型和焦距, 优化增益光纤长度等来提高抽运光的转换效率。实验结果验证了 $1150\ \text{nm}$ 光纤激光振荡器作为中红外掺铽光纤激光抽运源的可行性。未来将在中红外掺铽光纤激光器的功率提升、光谱调谐、脉冲输出等方面开展相关研究工作。

5 结 论

搭建了一台线型腔中红外掺铽光纤激光器, 该激光器采用自行研制的 $1150\ \text{nm}$ 光纤激光振荡器作为抽运源, 增益介质为双包层铽掺氟化物光纤, 实现了中红外波段掺铽光纤激光器出光。当 $1150\ \text{nm}$ 抽运激光器功率为 $1.43\ \text{W}$ 时, 中红外波段掺铽光纤激光器输出功率为 $115\ \text{mW}$, 对应的光-光转换效率为 8.0% ; 在最大功率输出时, 激光中心波长为 $2868.4\ \text{nm}$, 输出光谱的 FWHM 为 $1.3\ \text{nm}$ 。采用 $1150\ \text{nm}$ 光纤激光振荡器作为中红外掺铽光纤激光器的抽运光源, 结合相关的光纤光栅刻写技术、光纤后处理技术以及不断发展的光纤器件制备工艺, 有望研制高功率全光纤化中红外掺铽光纤激光器。

参 考 文 献

- [1] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 423-431.
- [2] Zhu X S, Peyghambarian N. High-Power ZBLAN glass fiber lasers: review and prospect [J]. Advances in OptoElectronics, 2010: 149-154.
- [3] Foritn V, Bernier M, Bah S T, *et al.* 30 W fluoride glass all-fiber laser at $2.94\ \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2882-2885.
- [4] Huang Yuanfang, Peng Yuefeng, Wei Xingbin, *et al.* Watt-level continuous wave $2.8\ \mu\text{m}$ mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502007.
黄园芳, 彭跃峰, 魏星斌, 等. 瓦级连续波 $2.8\ \mu\text{m}$ 中红外 Er:ZBLAN 光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502007.
- [5] Shen Yanlong, Huang Ke, Zhou Songqing, *et al.* 10 W-level high efficiency single-mode mid-infrared $2.8\ \mu\text{m}$ fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502008.
沈炎龙, 黄珂, 周松青, 等. 10 W 级高效率单模中红外 $2.8\ \mu\text{m}$ 光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502008.
- [6] Shen Yanlong, Chen Hongwei, Huang Ke, *et al.* Watt-level 100 nm Tunable mid-infrared fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1002008.
沈炎龙, 谌鸿伟, 黄珂, 等. 瓦级 100 nm 可调谐中红外 Er:ZBLAN 光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1002008.
- [7] Wang Lele, Luo Hongyu, Xie Jitao, *et al.* 15 W high power $2.9\ \mu\text{m}$ mid-infrared cascade Er:ZBLAN fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0719001.
王乐乐, 罗鸿禹, 谢记涛, 等. 15 W 高功率 $2.9\ \mu\text{m}$ 中红外级联掺铽 ZBLAN 光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0719001.
- [8] Jackson S D, Bugge F, Erbert G. Directly diode-pumped holmium fiber lasers[J]. Optics Letters, 2007, 32(17): 2496-2498.
- [9] Hu T, Hudson D D, Jackson S D. Actively Q-switched $2.9\ \mu\text{m}$ Ho³⁺/Pr³⁺-doped fluoride fiber laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2145-2147.
- [10] Li J F, Hudson D D, Yong Liu Y, *et al.* Efficient $2.87\ \mu\text{m}$ fiber laser passively switched using a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3747-3749.
- [11] Zhu G W, Zhu X S, Balakrishnan K, *et al.* Fe²⁺:ZnSe and graphene Q-switched singly Ho³⁺-doped ZBLAN fiber lasers at $3\ \mu\text{m}$ [J]. Optical Materials Express, 2013, 3(9): 1365-1377.
- [12] Luo Hongyu, Li Jianfeng, He Yulian, *et al.* High power $2.97\ \mu\text{m}$ mid-infrared passively Q-switched Ho-doped ZBLAN fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202003.
罗鸿禹, 李剑峰, 何雨莲, 等. 高功率 $2.97\ \mu\text{m}$ 中红外被动调 Q 掺铽 ZBLAN 光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202003.

- [13] Li J F, Luo H Y, Wang L L, *et al.* Mid-infrared passively switched pulsed dual wavelength Ho³⁺-doped fluoride fiber laser at 3 μm and 2 μm [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10770.
- [14] Crawford S, Hudson D D, Jackson S D. High Power, broadly tunable 3- μm fiber laser for the measurement of optical fiber loss[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-9.
- [15] Miao Y, Zhang H W, Xiao H, *et al.* High-power diode-pumped ytterbium-doped fiber laser at 1150 nm[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(9): 091403.
- [16] Chen Hongwei, Shen Yanlong, Tao Mengmeng, *et al.* Experimental investigation of an 1150 nm fiber laser oscillator [J]. *Modern Applied Physics*, 2015, 6(4): 254-258.
 谌鸿伟, 沈炎龙, 陶蒙蒙, 等. 1150 nm 波段光纤激光振荡器实验研究[J]. *现代应用物理*, 2015, 6(4): 254-258.
- [17] Chen Hongwei, Shen Yanlong, Tao Mengmeng, *et al.* Experimental investigation of an 1150 nm Yb-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(10): 1014001.
 谌鸿伟, 沈炎龙, 陶蒙蒙, 等. 1150 nm 掺镱光纤激光器输出特性实验研究[J]. *光子学报*, 2016, 45(10): 1014001.
- [18] 韦 晨, 史红霞, 罗鸿禹, 等. 高功率波长可调谐中红外被动调 Q 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0915001.